

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСИЛИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПОВЕДЕНИЕ НЕМАГНИТНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ, В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРАХ

Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Якушев Н.С.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия, E-mail: a.u.konyaev@urfu.ru

Аннотация — Оценивается соотношение электромагнитных и механических сил в электродинамических сепараторах. Описано поведение немагнитных проводящих тел в бегущем магнитном поле сепаратора. Показана зависимость тангенциальной и нормальной составляющих электромагнитной силы от частоты поля и крупности извлекаемых проводящих тел. Для сепараторов с вращающимися индукторами и открытой магнитной системой отмечена возможность полезного использования таких составляющих усилий.

Ключевые слова — электродинамический сепаратор, соотношение сил, составляющие сил, частота поля, крупность включений.

ВВЕДЕНИЕ

Метод электродинамической сепарации в бегущем магнитном поле, основанный на силовом взаимодействии магнитного поля с вихревыми токами, наведенными этим полем в извлекаемых проводящих телах, находит все большее применение в технологиях переработки твердых металлосодержащих отходов, а также технологиях сбора и обработки лома и отходов цветных металлов [1-3]. Применяемые в таких технологиях электродинамические сепараторы отличаются разнообразием конструкций, зависящих как от способа формирования бегущих магнитных полей, так и от способов подачи обрабатываемых материалов в зону сепарации и отвода из нее продуктов разделения [3].

Бегущее магнитное поле в сепараторах может создаваться трехфазными линейными индукторами, вращающимися индукторами на основе постоянных магнитов или электромагнитов, индукторами с модуляцией высокочастотного бегущего магнитного поля, достигаемой при вращении в поле зубчатого ротора. Величина и характер электромагнитных сил, обеспечивающих извлечение металлических тел из потока обрабатываемых материалов, определяется, прежде всего, параметрами бегущего магнитного поля (полусное деление τ , частота f , амплитуда магнитной индукции B_m).

По способам подачи и отвода материалов можно выделить четыре основные группы установок электродинамической сепарации:

1. Сепараторы с подачей материалов в свободном падении.
2. Сепараторы с подачей материала по ленте

конвейера и выходом проводящей фракции в сторону от него.

3. Сепараторы с подачей материала по наклонной плоскости и отводом выделяемых продуктов в сторону от потока.

4. Сепараторы шкивного типа, в которых извлекаемые проводящие тела отводятся по параболической траектории.

С учетом сказанного электродинамические сепараторы должны рассматриваться как сложные электромеханические системы, в которых конечный результат (извлечение металлических тел из потока материалов) зависит от совместного действия электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил. Величина и характер механических сил определяются конструкцией и параметрами механической части установок электродинамической сепарации. Совокупность таких сил необходимо учитывать при расчете процессов массопереноса, при формировании траекторий движения извлекаемых при сепарации тел. Особенно заметно влияние механических сил в случаях, когда электромагнитные усилия невелики: в установках малой мощности, в сепараторах, предназначенных для обработки измельченных отходов, либо обогащения материалов с низкой электропроводностью.

При росте мощности индукторов, создающих магнитное поле в сепараторах, электромагнитные силы растут, а механические силы изменяются незначительно. В этом случае влияние механических сил на конечный результат менее заметно. Сказанное иллюстрируется расчетами, выполненными ранее в [3] для электродинамического сепаратора шкивного типа с вращающимися индукторами, схематично показанного на рис. 1. Траектория движения извлекаемых металлических частиц в данном случае зависит от совместного действия электромагнитных и механических сил (гравитации, трения, центробежной). В частности, в зависимости от величины и направления результирующей силы будет изменяться угол отрыва извлекаемых проводящих тел от шкива (угол, отсчитываемый от верхней точки шкива до точки отрыва и определяемый из условия равенства нулю нормальной к поверхности прижимающей силы) [3].

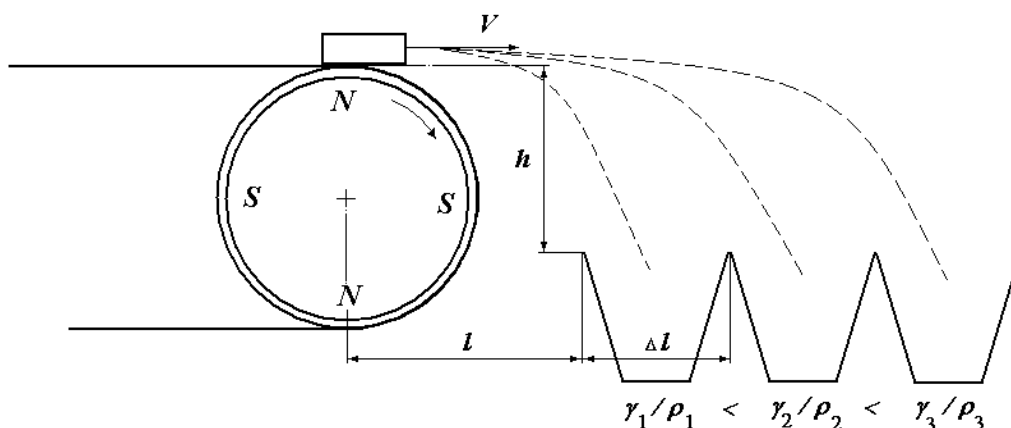


Рис. 1. Схема сепаратора шкивного типа для сортировки металлов по электропроводности

На рис. 2 показано изменение углов отрыва $\alpha_{кр}$ от скорости подачи материала по конвейеру V_k при увеличении значения удельного электромагнитного усилия извлечения — отношения тангенциального (направленного по касательной к поверхности шкива) электромагнитного усилия к массе извлекаемых тел $F_m = F/m$ (Н/кг или м/с). Расчеты проведены по методике, изложенной в [3], для радиуса шкива $R = 0,1$ м при коэффициентах трения $k_{тр} = 0,4$ (сплошные линии) и $0,1$ (пунктир) для удельных электромагнитных усилий $F_m = 0$ (кривые 1-2); $5,0$ (3-4) и $10,0$ Н/кг (5-6). При отсутствии электромагнитных сил значение угла отрыва определяется только действием механических сил, прежде всего, центробежной.

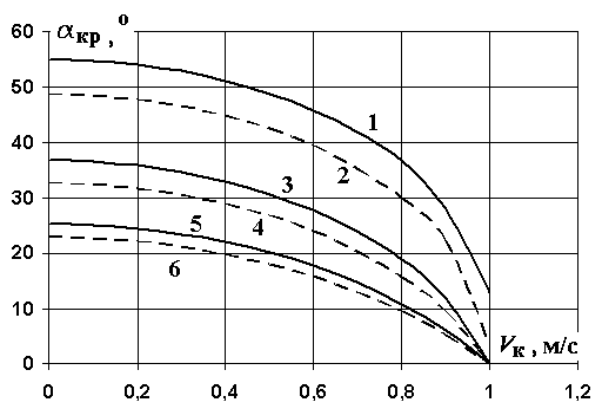


Рис. 2. Влияние электромагнитного усилия на величину угла отрыва проводящих частиц

Нетрудно видеть, что с ростом электромагнитной силы, угол отрыва существенно изменяется, приближаясь к значению $\alpha_{кр} = 0$, где центробежная сила отсутствует.

Приведенный пример, является свидетельством того, что именно от величины и характера электромагнитного усилия будет зависеть

работоспособность и эффективность работы электродинамического сепаратора. Поэтому оценка электромагнитных сил, определяющих характер движения проводящих тел в бегущем магнитном поле, является одной из основных задач, возникающих при исследованиях и проектировании электродинамических сепараторов.

Как показывает обзор литературы, исследованию характера и величины силового воздействия бегущего магнитного поля электродинамических сепараторов на извлекаемые проводящие тела уделяется недостаточное внимание. Можно отметить лишь ряд публикаций, посвященных экспериментальной оценке такого воздействия [4-5]. В данной работе показаны возможности моделирования процессов электродинамической сепарации и теоретической оценки создаваемых в сепараторе электромагнитных сил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ СЕПАРАТОРЕ

По принципу действия электродинамические сепараторы можно сравнить с линейными асинхронными двигателями. В то же время электромагнитные процессы в сепараторах характеризуются рядом особенностей, определяемых, главным образом, малыми размерами извлекаемых проводящих тел, как правило, меньших, чем полюсное деление бегущего магнитного поля. Как показывают экспериментальные исследования, выполненные авторами, а также описанные в [4-5], движение проводящих тел в бегущем магнитном поле носит сложный и неоднозначный характер. Это объясняется сложным воздействием на тела тангенциальной и нормальной составляющих электромагнитной силы, а также силы бокового смещения и вращающих моментов, как показано на рис. 3.

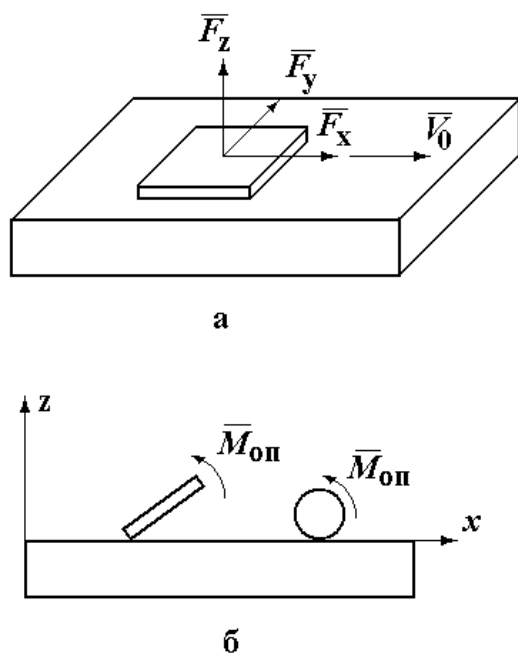


Рис. 3. Электромагнитные силы и моменты, действующие на проводящее тело в бегущем магнитном поле сепаратора (V_0 – скорость поля)

Тангенциальная составляющая силы F_x , обусловленная взаимодействием нормальной составляющей индукции магнитного поля с токами, замыкающимися в проводящих телах в поперечном направлении, стремится переместить тело в направлении движения поля. Нормальная составляющая силы F_z обусловлена взаимодействием вторичных токов с тангенциальной составляющей индукции поля и стремится оттолкнуть проводящие тела от индуктора (вытолкнуть из поля). Наконец, взаимодействие лобовых составляющих вторичных токов с магнитным полем индуктора приводит к появлению поперечных сил, которые при нахождении проводящего тела внутри активной зоны могут быть уравновешены. При смещении проводящих тел от оси индуктора и выходе его части за пределы активной зоны появляется неуравновешенная боковая сила F_y , выталкивающая тело из активной зоны в направлении первоначального смещения. Неравномерное распределение нормальных сил по длине проводящего тела и их неуравновешенность приводят к появлению опрокидывающего момента $M_{оп}$. Под действием такого момента передний край (в направлении поля) плоских тел приподнимается над индуктором, а задний прижимается к нему. В случаях, когда продольный размер проводящего тела $b \ll \tau$ оно начинает вращаться над индуктором, или перекачивается по его поверхности в направлении, противоположном движению поля.

Процессы сепарации реализуются за счет действия тангенциальной и нормальной

составляющих электромагнитной силы F_x и F_z , поэтому практический интерес представляет оценка этих составляющих.

В общем случае электромагнитная сила $F_{эм}$, действующая на элементарный объем $dxdydz$ проводящего тела, помещенного в бегущее магнитное поле, определяется выражением [6]

$$dF_{эм} = B_1 j_2 dx dy dz = \mu_0 (H_1 + H_2) j_2 dx dy dz, \quad (1)$$

где B_1 – индукция магнитного поля индуктора; j_2 – плотность вторичного тока; μ_0 – магнитная постоянная; H_1 и H_2 – напряженности составляющих магнитного поля, создаваемых током индуктора и вторичным током соответственно.

При равномерном распределении магнитного поля в активной зоне взаимодействие вторичных токов с собственным магнитным полем не создает усилия [6]. Поэтому выражение (1) упрощается

$$dF_{эм} = \mu_0 H_1 j_2 dx dy dz. \quad (2)$$

При таком допущении на основании решения полевой задачи можно получить аналитическое выражение для электромагнитного усилия, действующего в бегущем магнитном поле на проводящее тело ограниченных размеров. Например, в [7] для расчета усилий извлечения (тангенциальной составляющей) предложено выражение вида:

$$F_x = \frac{4}{\pi \mu_0 \tau} ab \delta \epsilon_0 s B_m^2 \cdot k_F, \quad (3)$$

В (3) принято

$$\epsilon_o = \frac{\omega \mu_o \gamma}{\alpha^2} \cdot \frac{d}{\delta_e}, \quad (4)$$

- электромагнитная добротность линейной индукционной машины (ЛИМ); γ – удельная электропроводность материала; a – ширина проводящей пластины, выполняющей роль вторичного элемента (ВЭ) ЛИМ; b – длина (в направлении движения поля) ВЭ; d – толщина ВЭ; δ – эквивалентный воздушный зазор; s – скольжение; $\alpha = \pi/\tau$; τ – полюсное деление индуктора; k_F – коэффициент, учитывающий возмущение усилия, связанное с ограниченностью размеров проводящей пластины [7] (из-за громоздкости выражение не приводится).

Выражение (3) получено при условии существования в активной зоне сепаратора только нормальной составляющей индукции магнитного поля, что не позволяет рассчитывать действующие на проводящую пластину нормальные усилия и моменты. Поэтому применение расчетного выражения (3) ограничено, а учесть все особенности распределения магнитных полей,

вторичных токов и электромагнитных усилий в электродинамических сепараторах можно только в рамках численных методов расчета. Например, можно использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете Elcut. При моделировании электродинамических сепараторов в такой программе удастся рассчитать распределение магнитного поля в продольном сечении активной зоны при любой конфигурации магнитной системы. Двухмерная постановка задачи расчета поля в данном случае вполне допустима, поскольку изменения магнитного поля по координате y сосредоточены только на боковых краях индуктора. Двумерное распределение вторичных токов в проводящей пластине учитывается в программе путем разбиения ВЭ на ряд участков и задания условий замыкания вторичных токов. Пример, расчета распределения магнитного поля в электродинамическом сепараторе с вращающимся шестиполусным индуктором показан на рис. 4. Основные его параметры: диаметр — 111 мм; полюсное деление — 58,1 мм; минимальное удаление пластины от индуктора — 2,5 мм. Катушки обмотки возбуждения соединены последовательно, каждая из них содержит 345 витков. Моделировалось воздействие сепаратора на алюминиевую пластину с размерами $60 \times 60 \times 5$ мм.

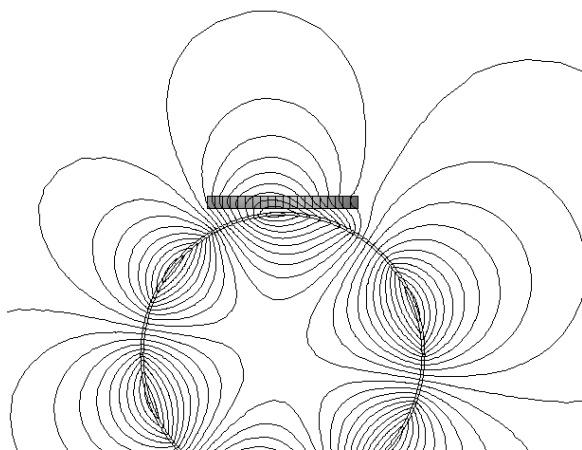


Рис.4. Картина магнитного поля в сепараторе с вращающимся индуктором

Возможность расчета двухмерной картины поля и распределения вторичных токов в извлекаемой пластине позволяет рассчитать как тангенциальные, так и нормальные составляющие электромагнитных усилий. Например, на рис. 5 показаны зависимости составляющих удельного электромагнитного усилия ($F_m = F/m$ — отношение электромагнитного усилия к массе извлекаемых проводящих тел, Н/кг или м/с) от относительного размера квадратных алюминиевых пластин толщиной 5 мм. Расчеты выполнены для разных значений частот бегущего магнитного поля.

Как видно из рис. 5, при частоте 50 Гц тангенциальная составляющая усилия существенно превосходит нормальную. Такое же соотношение составляющих усилия наблюдается во всем рассмотренном диапазоне частот при малых

размерах извлекаемых пластин ($b < 0,5\tau$). С ростом размеров пластин и частоты поля влияние нормальных составляющих усилия возрастает.

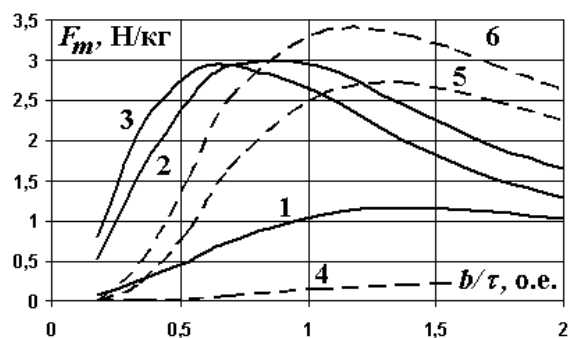


Рис. 5. Зависимости тангенциальных (сплошные линии) и нормальных (пунктир) составляющих удельных электромагнитных усилий от размера пластин для частот 50 (1,4); 350 (2,5) и 550 Гц (3,6)

Таким образом, исследования показали, что поведение проводящих тел в магнитном поле электродинамических сепараторов не может объясняться только действием тангенциальной составляющей электромагнитного усилия. Возможность определения других составляющих усилия появляется при численных расчетах сепараторов (например, по программе Elcut).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шубов Л.Я., Технология отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник — М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. 352 с.
- Колобов Г.А., Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов / Г.А. Колобов, В.Н. Бредихин, В.М. Чернобаев — М.: Металлургия, 1993. 288с.
2. Коняев А.Ю., Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.Е. Маркин. — Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2012. 104 с.
- Черепнин О.М., Шевелев А.И., Шаимова И.Г. Сепарация немагнитных цветных металлов в бегущем магнитном поле // Цветные металлы, 1985, № 11, с. 85-87.
3. Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Удинцев В.Н. Исследование усилий, действующих на проводящие предметы в электродинамическом сепараторе // Современные проблемы энергетики, электромеханики и электротехнологии // Вестник УГТУ. Екатеринбург, 1995. ч.2. С. 237 - 240.
4. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. — Л.: Энергия, 1970. 272 с.
5. Коняев А.Ю., Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника, 1998, № 5, с. 52-57.